



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS**

№2, ТОМ 13 (2007) 79-86

УДК 624.315

(07)-0138-1

НЕУЗГОДЖЕНІСТЬ ОПОРНИХ ВУЗЛІВ ЯК ПАРАМЕТР ОЦІНКИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОПОР ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

А.О. Кудлай

*Оренбургський державний університет,
пр. Перемоги 13, Оренбург, 460352, Російська Федерація.
E-mail: project-group@mail.ru*

Отримана 6 квітня 2007; прийнята 20 квітня 2007

Анотація. Стаття присвячена оцінці надійності сталевих опор ліній електропередачі. В даний час часовий ресурс існуючих опор здебільшого вичерпаний, проте заміна їх пов'язана з великими матеріальними витратами. За спостереженнями автора статті в переважній більшості сталеві опори знаходяться в працездатному стані, і термін їх служби може бути продовжений. У той же час автором виявлена наявність відносних зсувів опорних вузлів чотириногих опор, що приводить (через статичну невизначеність схеми) до появи додаткових внутрішніх зусиль. Виконані з використанням програмних комплексів розрахунки показали, що в окремих випадках за несприятливих погодних умов можлива втрата стійкості опор, незважаючи на повну відповідність опор проектним вимогам. Пропонується внести корективи в існуючі нормативні документи.

Ключові слова: повітряні лінії електропередачі, опора, напружено-деформований стан, різниця відміток, крен, неузгодженість вузлів.

РАССОГЛАСОВАНИЕ ОПОРНЫХ УЗЛОВ КАК ПАРАМЕТР ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОПОР ЛЭП

А.А. Кудлай

*Оренбургский государственный университет,
пр. Победы 13, 460352, г. Оренбург, Российская Федерация.
E-mail: project-group@mail.ru*

Получена 6 апреля 2007; принята 20 апреля 2007

Аннотация. Статья посвящена оценке надежности стальных опор линий электропередач. В настоящее время временной ресурс существующих опор в большинстве своем исчерпан, однако замена их связана с большими материальными затратами. По наблюдениям автора статьи в подавляющем большинстве стальные опоры находятся в работоспособном состоянии, и срок их службы может быть продлен. В то же время автором выявлено наличие относительных смещений подножников четырехногих опор, приводящее (в силу статической неопределенности схемы) к появлению дополнительных внутренних усилий. Выполненные с использованием программных комплексов расчеты показали, что в отдельных случаях при неблагоприятных погодных условиях возможна потеря устойчивости опор, несмотря на полное соответствие опор проектным требованиям. Предлагается внести коррективы в существующие нормативные документы.

Ключевые слова: воздушные линии электропередач, опора, напряженно-деформированное состояние, разность отметок, крен, рассогласование узлов.

MISMATCH OF BASIC UNITS AS A PARAMETER OF ESTIMATING A DEFLECTED MODE OF POWER TRANSMISSION LINES (PTL)

A.A. Kudlay

Orenburg State University,
13, Pobedy Avenue, Orenburg, 460352, the Russian Federation.
E-mail: sergey@icm.dn.ua

Received 6 April 2007; accepted 20 April 2007

Abstract. This article is devoted to an estimation of the reliability of PTL steel towers. Nowadays, a durability of the existing towers is mainly exhausted, but their replacement involves high material costs. According to the author's observations, in most cases steel towers are in a good working condition and their service life can be prolonged. At the same time the author found out the presence of relative displacements of basic units of tetrahedral towers that cause (due to some static indeterminateness of the scheme) additional internal effects. The calculations done with the help of the program complexes have showed that in some cases under adverse weather conditions a loss of tower stability can take place despite full correspondences of towers to the project requirements. Corrections to the existing normative documents are suggested to be done.

Keywords: overhead power transmission lines, tower, a deflected mode, height difference, a heeling, mismatch of units.

Введение

Важная составляющая энергетической сети – ее передающее звено. Чаще всего это воздушные линии электропередачи, которые служат для передачи и распределения электрической энергии по проводам, расположенным на открытом воздухе и закрепленным при помощи изоляторов и линейной арматуры на опорах.

Статистика аварий и эксплуатационные характеристики стальных конструкций опор ставят вопрос о продлении срока службы таких опор более, чем предусмотрено при проектировании как в странах СНГ, так и дальнего зарубежья [10, 11, 12]. Наряду с этим можно выделить отдельные факты аварий стальных опор в энергосистеме, когда происходили аварии опор при расчетных или близких к расчетным режимах работы.

Часто последствия аварий для разных стоек на протяжении аварийного участка неодинаковы. В одних случаях аварийное воздействие не оставляет видимых разрушений, и работоспособность всего сооружения не нарушается. В других – наблюдаются дефекты отдельных узлов и элементов. В третьих случаях те же воздействия приводят к потере работоспособности всего сооружения.

Это свидетельствует о том, что существуют разные причины аварий. Такими причинами могут быть:

- дефекты изготовления и неправильный монтаж конструкций;
- отсутствие контроля и неправильная эксплуатация сооружений;
- проектные ошибки;
- возникновение дополнительных факторов, имеющих неполное отражение в нормативах.

В то же время опоры часто находятся в работоспособном состоянии, и срок их службы может быть продлен.

Существующий порядок учета разности отметок креплений опор к фундаментам

При обследовании несущих конструкций и оценке их технического состояния на территории Российской Федерации необходимо руководствоваться РД 34.45-51.300-97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования» [6] и РД 34.20.504-94 Типовая инструкция по эксплуатации воздушных линий электропередачи напряжением 35-800 кВ [5].

Одним из основных показателей состояния конструкции является состояние фундаментов и опорных узлов – подножников.

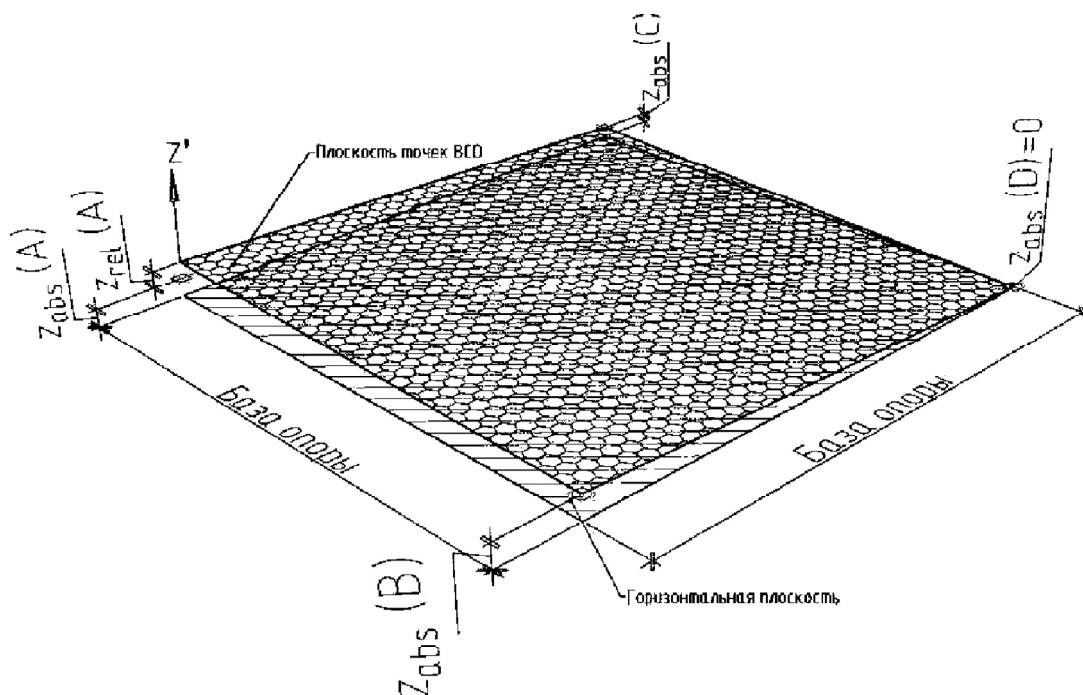


Рис. 1. Схема взаимного расположения опорных точек.

Оба норматива регламентируют разность между высотными отметками подножников не более 20 мм (РД 34.45-51.300-97 в части 30. 2. 2 «Контроль состояния фундаментов», как и РД 34.20.504-94 в п. 4. 4. 2). При этом не делается различий для типов опор (промежуточные, анкерные, анкерно-угловые), их размеров и других параметров, в случае, если иное не указано типовым проектом на изготовление опоры.

Указанные нормативы в части допусков на разность высотных отметок подножников воспроизводят требования таблицы 37 СНиП III-18-75 «Металлические конструкции» [7]. При этом не регламентируется зависимость этой величины от:

- типа опоры (анкерная, угловая или промежуточная);
- высоты опоры;
- размеров основания в плане;
- внешней статической неопределенности (например, не делается различия между «трех-» и «четырёхногими» опорами).

Также не регламентирована зависимость величины крена сооружения от:

- типа опоры;
- размеров основания в плане;
- внешней статической неопределенности.

В реальных конструкциях опорные узлы (подножники) практически всегда имеют различные отметки по высоте относительно горизонтальной плоскости. Разность этих отметок контролируется геодезическими приборами и нормируется указанными выше документами [5,6]. Конструкции опор воздушных линий (ВЛ) геометрически неизменяемы и изготовлены так, что все четыре опорных узла лежат в плоскости. Рассмотренная схема имеет внешнюю статическую неопределенность. У опор три необходимых и одна «лишняя» связь. Независимо от значений вертикальных отметок, если все четыре опорных узла не лежат в одной плоскости, то три из них будут закреплены в общей плоскости, а четвертый будет находиться на расстоянии от неё. В этом случае можно говорить о смещении опорного узла из исходной плоскости. Причем смещение опорного узла будет вызывать дополнительные усилия, вызванные изменением начальной геометрии конструкции.

Геометрический смысл величины рассогласования опорных узлов (РОУ)

Обозначим разность вертикальных отметок подножников — z_{abs} . Длину перпендикуляра,

проведенного через одну из четырех опорных точек, не лежащих в одной плоскости, к плоскости, образованной тремя другими, обозначим z_{rel} и будем называть «величиной рассогласования опорных узлов».

На рис. 1 линейной штриховкой показана условная горизонтальная плоскость, проходящая через точку D , с минимальной вертикальной отметкой. Опорные узлы не лежат в одной плоскости. Расстояния от этой плоскости до опорных узлов имеют значения z_{abs} (разность вертикальных отметок подножников). Плоскость, заданная тремя точками опор BCD , обозначена гексагональной штриховкой. Расстояние от нее до точки A , не лежащей в этой плоскости, будет величиной рассогласования опорных узлов (z_{rel}) для узла A . Именно величина рассогласования опорных узлов (z_{rel}) будет определять уровень усилий в элементах, вызванных разностью вертикальных отметок подножников (z_{abs}).

Впервые недостаточность нормируемой величины разности вертикальных отметок подножников для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций опор ЛЭП была описана в статье [3]. Типовые проекты на изготовление и монтаж опор не учитывают возможного изменения отметок фундаментов и соответственно появления дополнительных нагрузок. Кроме того, в справочной и нормативной литературе по расчету и конструированию опор ВЛ не представлены примеры такого расчета.

В проектных схемах загрузки отсутствуют загрузки, учитывающие смещение уровня подножников по высоте и в плане.

В монографии Крюкова К. П. и др. «Конструкции и расчет металлических и железобетонных опор линий электропередачи» [2] даются рекомендации для расчёта опор с учетом перемещений фундаментов в грунте. При этом учитываются:

- 1) угловые деформации фундаментов при расчёте порталных рамных опор;
- 2) горизонтальные перемещения вырываемых и вдавливаемых фундаментов при расчёте распределения горизонтальных реакций между растянутыми и сжатыми ногами опор;
- 3) угловые деформации и горизонтальные перемещения фундаментов при расчёте ши-

рокобазной части опор как пространственной конструкции.

Возможное изменение отметок подножников не учитывается.

Также сегодня не учитывается возможная потеря статической неопределимости статически неопределимых строительных конструкций на отдельных фундаментах, т. е. выключение из работы одного из четырех фундаментов, которое имеет место в конструкциях при:

- зависании подножника над фундаментом,
- разрушении бетонной подливки,
- ослаблении гаек фундаментных болтов (вследствие динамической нагрузки),
- дефектах основания, тела фундамента и др.

В разработанной университетом Квинсленда (Канада) совместно с Гонконгским городским университетом и департаментом отдела строительства (Гонконг, Китай) методике числового моделирования поведения структурных башен электропередачи (Numerical simulation of structural behaviour of transmission towers) учитывается возможность расчета на различное положение опорных узлов, однако данные о проведении таких расчетов не приводятся [13, 14].

В то же время явление рассогласования опорных узлов не редкое явление, о чем свидетельствуют проведенные автором обследования опор и данные собственных мероприятий по обследованию и реконструкции линий электропередачи ОАО «Энергосетьпроект» г. Москва [15].

Выявленные фактические значения величины РОУ и разностей отметок

Летом 2006 г. автором для выяснения реальных величин описанных параметров были проведены нивелировка подножников и измерение отклонений от вертикали для выборки 100 шт. опор ЛЭП в г. Оренбурге и его пригородных районах. Опоры свободностоящие, стальные, четырехгранные, на отдельных фундаментах принадлежат различным линиям, эксплуатируются более 5 лет, размеры баз опор от 1.8×2.4 до 9×9 м.

Обследования показали наличие отклонений выше допустимых значений изучаемых величин. В результате инструментального контроля не обнаружено ни одной опоры, у которой все четыре опорные точки находятся в

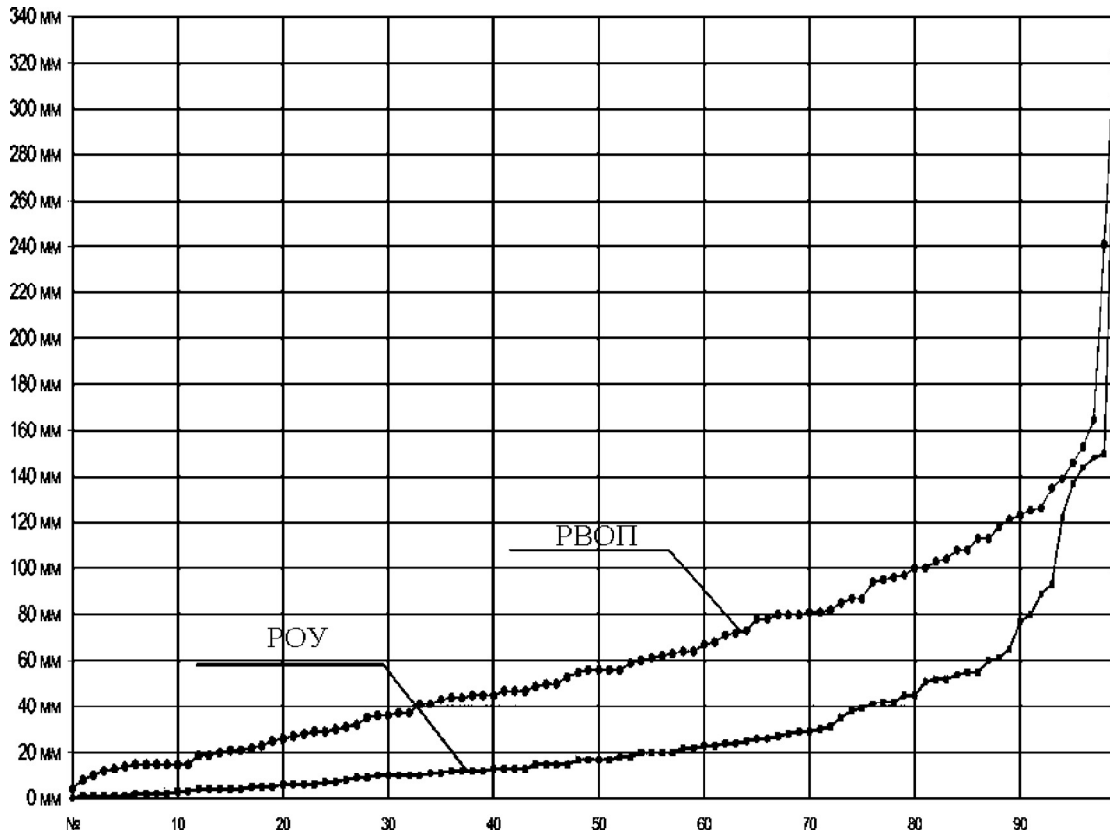


Рис. 2. Сравнение разности вертикальных отметок подножников – РВОП с величиной расхождения опорных узлов – РОУ, вычисленных для обследованных опор.

одной горизонтальной плоскости. При этом разность отметок подножников в большинстве случаев более 20 мм и достигает 323 мм.

Следует отметить, что только для 15% конструкций разность вертикальных отметок в пределах 20 мм. Однако при вычислении величины расхождения опорных узлов получены следующие данные (рис 2):

- для 56% – величина расхождения в пределах 20 мм;
- в том числе для 20% опор расхождение составляет не более 5 мм.

На рис. 2 в порядке возрастания расположены значения разности отметок (z_{abs}) – верхняя линия на графике и величины расхождения (z_{rel}) – нижняя линия для обследованных опор.

Таким образом, целесообразно снизить требования к эксплуатируемым конструкциям в допусках максимального крена сооружения и разности отметок подножников при условии отсутствия расхождения опорных узлов (РОУ). В то же время, используя величину рас-

согласования, можно точно выделить конструкции, в первую очередь нуждающиеся в ремонте.

Сопоставление для обследованных опор (график рис. 3) величины крена, разности вертикальных отметок (РВОП) и величины расхождения (РОУ), вычисленные для обследования опор, наглядно показывает, что величины разности вертикальных отметок и соответствующие величины расхождения опорных узлов явной взаимосвязи между собой не обнаруживают.

Обнаруженные при осмотре дефекты элементов конструкции (непрямолинейность поясов, раскосов; неплотное прилегание подножника; негоризонтальность опорных пластин башмаков опоры, наклон оси фундамента) в большинстве случаев согласуются с данными нивелировки и креном сооружения. При этом характерно, что при минимальных значениях величины расхождения опорных узлов (до 5 мм), независимо от величины крена сооружения и разности вертикальных отметок, дефекты не наблюдаются.

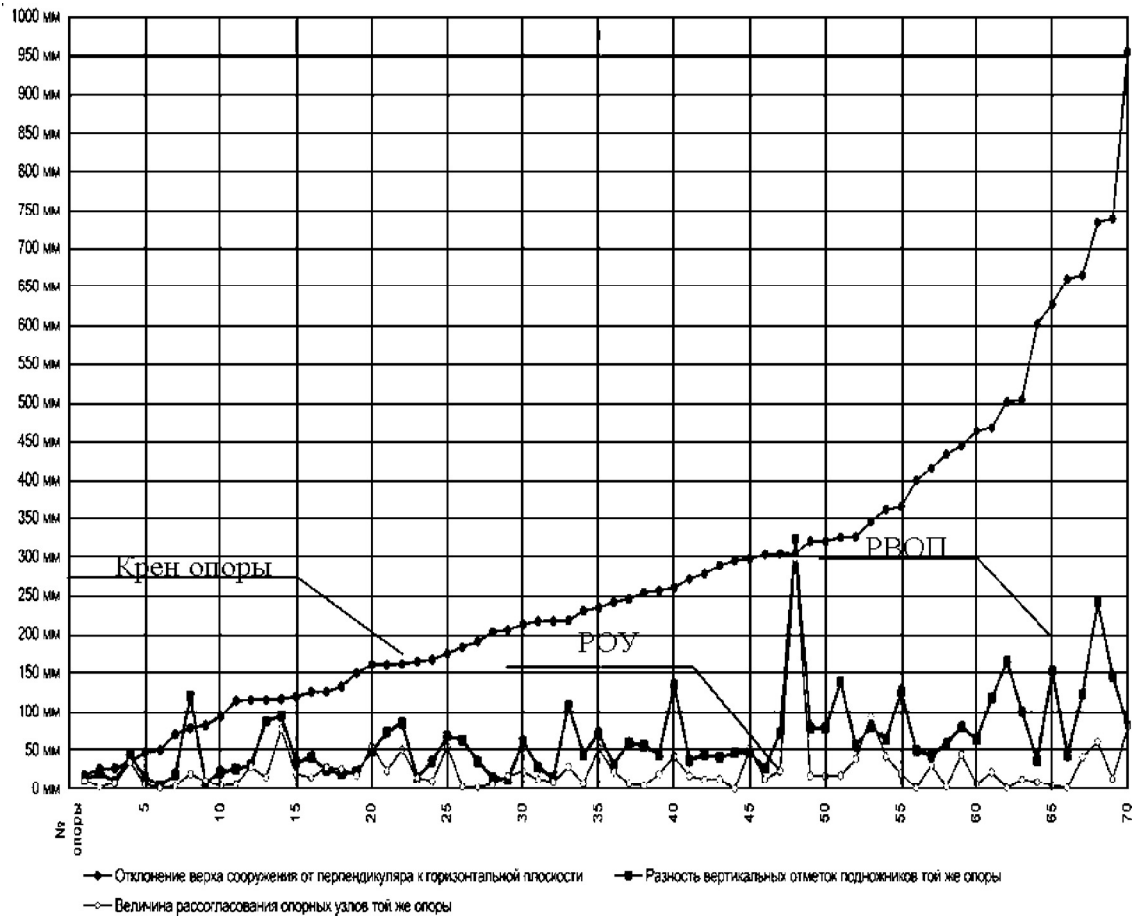


Рис. 3. Соотношение крена сооружения с разностью отметок подножников и величиной рассогласования опорных узлов.

А в случаях, когда величина рассогласования опорных узлов более 20 мм, часто присутствуют погибы раскосов и поясов, зависания подножников или крен оси фундамента.

В то же время, если по данным нивелировки построить четыре условные точки – предположительные положения вершины конструкции – в зависимости от того, какая из четырех опор отклоняется из опорной плоскости, то ближайшая теоретическая точка к фактической вершине укажет на дефектный опорный узел. В большей части случаев это зависший подножник.

Влияние рассогласования на напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции

Основываясь на проведенных исследованиях можно отметить, что действующие в настоящее

время нормативные документы, не полностью учитывают состояние опор. Используемая величина разности вертикальных отметок подножников не всегда отражает реальное напряженно-деформированное состояние конструкций.

С целью определения влияния на конструкции указанных отклонений выполнены статические расчеты с учетом этих отклонений.

Для проведения анализа в качестве объекта изучения взят один из наиболее широко применяемых на практике типовых проект № 3.407-68 «Промежуточные опоры 35 и 110 кВ» [8]. В проведенных расчетах использовалась конструктивная схема двухцепной опоры с геометрическими размерами элементов и сечениями согласно проекту. Нагрузки на элементы приняты на основе проекта. Для оценки правильности используемой в работе расчетной схемы произведен статический

расчет по одной из схем загрузки, являющейся расчетной для поясов ствола опоры. Расчет производился согласно пособию к СНиП 11-23-81* [4] с использованием ПК Лиры 9.2 [9]. Разница значений усилий, указанных в проекте и результатов расчета, находится в пределах 1%.

Кроме проектных нагрузок в схему вводились дополнительные факторы:

- 1) смещение одного из подножников по высоте на величину, допускаемую РД 34.20.504-94 вниз и вверх ступенчато по 5 мм (+5, +10, +15, +20, -5, -10, -15, -20);
- 2) смещение одного из подножников по высоте на величину более допустимой РД 34.20.504-94 вниз и вверх ступенчато (+30, +50, -30, -50);
- 3) «отсутствие» одной из опор, т. е. исключение вертикальной связи из работы одного из фундаментов.

По результатам расчетов сделаны следующие заключения:

1. Сечения элементов конструкций опор назначены с некоторыми запасами, которые частично компенсируют возникающие усилия от дополнительного смещения опорных узлов.
2. Различные расчетные модели конструкций опор по-разному реагируют на одно и то же значение вертикального смещения подножника.
3. Нормативное значение предельно допустимой величины вертикального рассогласования уровней подножников 2 см вызывает дополнительные усилия в расчетной модели сооружения выше предельных значений для используемых сечений. Из этого следует, что величина 2 см может оказаться больше критической, и поэтому величина допустимого рассогласования опорных узлов должна назначаться индивидуально для каждой расчетной схемы. В общем случае рекомендуется ужесточить допуск до 5 мм.

Наибольшие значения дополнительных усилий от вертикального смещения подножника возникает в элементах, расположенных ближе к опорным узлам расчетной модели. Во всех случаях совместного действия расчетной нагрузки для поясов и вертикального смещения подножника наиболее нагруженный конечный элемент расчетной модели находился на высоте до 1,7 м (в зависимости от модели). В дан-

ном случае прослеживается аналогия с фактическими обрушениями опор линий электропередачи, в которых первый отказавший элемент находился в приопорной зоне.

Наиболее уязвимая часть опоры – место стыка вертикальных поясов и наклонных, поэтому излом опоры вследствие перегрузки будет происходить чаще всего в этом месте, а другие виды разрушений будут сравнительно редкими. Однако, исходя из данных фотоматериалов аварий, довольно часто излом опоры происходит на высоте до 2 м от земли. Основываясь на результатах численного исследования, можно утверждать, что в ряде случаев обрушений значимым фактором было рассогласование опорных узлов конструкции.

Выводы

1. В нормативную литературу необходимо ввести параметр рассогласования опорных узлов, рассматриваемый в совокупности с величиной относительного крена конструкции.
2. При проектировании новых конструкций жестко закрепленных сооружений на отдельных фундаментах в части допусков на изготовление и монтаж необходимо регламентировать указанные величины, исходя из расчета конструкций по предельным состояниям.
3. Организациям, специализирующимся на эксплуатации сооружений стальных опор воздушных линий электропередачи:
 - при оценке технического состояния стальных опор целесообразно учитывать величину рассогласования опорных узлов в дополнение к разности вертикальных отметок (при величине рассогласования опорных узлов более 5 мм следует определять действительное напряженно-деформированное состояние опоры);
 - при обработке результатов обследований для определения расчетных усилий, а также при назначении допусков разности высотных отметок подножников и крена сооружения необходимо учитывать взаимное влияние этих двух величин;
 - при назначении допусков на изготовление и монтаж конструкций опор необходимо учитывать характеристики основания.

Литература

1. Барг И. Г., Эдельман В. И. Воздушные линии электропередачи: Вопросы эксплуатации и надёжности. — М. Энергоатомиздат, 1985. — 248 с.: ил.
2. Крюков К. П., Новгородцев Б. П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи. — 2-к изд., перераб. и доп. — Л.: Энергия, Ленингр. Отделение, 1979. — 312 с., ил.
3. Миронов С. В., Кудлай А.А. О зависимости надежности стальных опор линий электропередачи от рассогласования вертикальных отметок их опорных узлов // Вестник ОГУ. — 2006. — №9, часть 2. — С.308-311.
4. Пособие по проектированию стальных конструкций опор воздушных линий электропередачи и открытых распределительных устройств подстанций напряжением свыше 1 кВ (к СНиП II-23-81* «Стальные конструкции») / Энергосеть-проект: Минэнерго СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР. — 1989. — 72 с.
5. РД 34.20.504-94 «Типовая инструкция по эксплуатации воздушных линий электропередачи напряжением 35-800 кВ»
6. РД 34.45-51.300-97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования»
7. СНиП III-18-75 «Металлические конструкции». — М.: Стройиздат. — 1976.
8. Типовой проект. Унифицированные стальные нормальные опоры ВЛ 35, 110 и 150 кВ. Промежуточные опоры 35 кВ. Шифры П35-2Н, У35-2Н, У110-2Н — Л.: Энергосетьпроект. — 1972.
9. Программный комплекс Лира 9.2, лиц. ключ № 493441573.
10. Instandhaltungsstrategien für Verteilungsnetze — Einordnung und Fallbeispiel Birkner P., Schottler R. ew: Elektrizitätswirt. 2005. 104, № 8, С.82-85, 3 ил., 1 табл. Библ 8 Нем.
11. Reenergizing the grid: Greater regulatory, legislative certainty needed. Fama James (NERC (США)). IEEE Power and Energy Mag. 2005. 3, № 5, С.30-33, 1 ил. Англ.
12. Les incidents sur le reseau electrique italien: Du deficit au black-out. Clo Alberto Rev. B. Soc. roy. beige elect. 2005. 121, № 1, С.40-42, 44, 46, 48-53, 4 ил., 2 табл. Библ. 27. Фр.; рез. англ, нидерл.
13. Albermani, F.G.A., Kitipornchai, S. and Chan, S.L. (1992), Formex formulation of transmission tower structures, International Journal of Space Structures, 7, 1, 1-10.
14. Electric Power Research Institute (1986), Structural development studies at the EPRI transmission line mechanical research facility, Interim Report No. 1: EPRI EL-4756, Sverdrup Technology Inc., Tullahoma, Tennessee.
15. Лязгин А.Л., Остробоподов С.В., Пустовойт Г.П., Шевцов К.П. «Выравнивание свайных фундаментов опор ЛЭП методов управления температурным режимом грунтов оснований «Основания, фундаменты и механика грунтов». — 2004. — №1. — С.20-23.

Кудлай Андрей Александрович – инженер кафедры «Технология строительного производства» Архитектурно-строительного факультета Государственного образовательного учреждения «Оренбургский государственный университет». Научные интересы: строительные конструкции, здания и сооружения, надежность стальных опор линий электропередачи.

Кудлай Андрій Олександрович – інженер кафедри «Технологія будівельного виробництва» архітектурно-будівельного факультету Державної освітньої установи «Оренбурзькій державний університет». Наукові інтереси: будівельні конструкції, будівлі і споруди, надійність сталевих опор ліній електропередачі.

Kudlay Andrey Alexandrovich – an engineer at the Department “Technology of Building Engineering” of the Architectural-Construction Faculty of the State Educational Institution «Orenburg State University». His research interests are: building structures and facilities, reliability of steel towers PTL.